

# Modelo compatible altura dominante - índice de sitio para mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd) del semidesierto de Durango

Compatible model dominant height - site index for mesquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd) from the semi-desert of Durango

José E. Galindo-Soto\*<sup>1</sup>; Benedicto Vargas-Larreta<sup>2</sup>;  
Francisco J. Hernández<sup>2</sup>; Francisco Cruz-Cobos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Intercultural de Sinaloa. Benito Juárez núm. 39.

C. P. 81890, Mochichahui, El Fuerte, Sinaloa, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n. C. P. 34942, El Salto, P.N., Durango, México.

\*Autor para correspondencia: enriquegs212@hotmail.com, tel.;52+ (675) 8765533

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una ecuación de crecimiento (altura dominante (de índice de sitio) para mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd), una de las especies características de las zonas áridas y semiáridas del norte de México, para la cual existe poca información sobre su crecimiento e incremento. Para ello se utilizó una base de datos de 40 análisis troncales de árboles medidos durante las actividades de aprovechamiento en el semidesierto de Durango. Para modelar el crecimiento dominante se ajustaron los modelos de Chapman-Richards y Schumacher mediante Diferencias Algebraicas (ADA), así como los modelos de Korf, Hossfeld y Chapman-Richards a través de Diferencias Algebraicas Generalizadas (GADA). Para corregir el problema de autocorrelación de los errores, la estructura del error fue modelada con una función de auto-regresión de primer orden (CAR(1)). Los modelos estimados con GADA presentaron mejores ajustes que aquellos estimados con ADA y describieron mejor el crecimiento dominante del mezquite. El análisis gráfico permitió corroborar lo anterior, así como concluir que el modelo de Chapman-Richards estimado mediante GADA es el mejor para desarrollar ecuaciones de índice de sitio para esta especie en el semidesierto de Durango.

**Palabras clave:** Zonas áridas, Chapman-Richards, diferencias algebraicas, generalizadas.

## Abstract

The aim of the present study was to develop a dominant height growth equation (site index) for mesquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd), one of the most important species of arid and semi-arid environments of northern Mexico, for which there is little information about its growth and increase. A database of 40 stems fallen during harvesting activities in the semi-desert of Durango was used. To model the dominant height growth, the Chapman-Richards and Schumacher models were adjusted using the Algebraic Differences Approach (ADA); meanwhile, Korf, Hossfeld and Chapman-Richards models were adjusted by the Generalized Algebraic Differences Approach (GADA). The problem of autocorrelation of the errors was corrected applying a first-order autoregressive model (CAR(1)). The GADA approach showed better goodness of fit than the ADA technique, and described more accurately the mesquite dominant growth. Graphical analysis corroborated those results and helps to conclude that the Chapman-Richards model estimated through GADA was the best as site index equation for mesquite in the semi-desert of Durango.

**Keywords:**  
Arid areas,  
Chapman-Richards,  
algebraic difference  
approach, generalized  
algebraic difference  
approach.

## Introducción

El mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd) es una especie arbórea que forma parte fundamental de los ecosistemas semiáridos de México y que en ciertos casos llega a ser dominante, constituyendo verdaderos bosques (Rzedowski, 1978). En las zonas áridas y semiáridas del país, el mezquite es una especie de gran importancia económica, social y ecológica, principalmente en la región centro-norte (estados de Zacatecas, Durango y Coahuila). Uno de los productos más importantes es la madera, muy apreciada por su resistencia y calidad para la elaboración de carbón (Meza & Osuna, 2003). Debido a esta característica, el mezquite constituye un recurso forestal maderable de gran importancia para los campesinos de las zonas áridas de Durango; sin embargo, su aprovechamiento y el cambio de uso del suelo han conducido a la degradación, relativamente acelerada, de sus comunidades (Valenzuela, Trucíos, Ríos, Sosa, & González, 2011), afectando en gran medida la economía de las comunidades rurales, así como el equilibrio ecológico de los mezquites. En consecuencia, es necesario aplicar técnicas silvícolas que permitan su aprovechamiento sostenible. Estudios sobre el crecimiento de esta especie no han sido reportados todavía en la literatura, por lo que esta investigación es la primera de su tipo con esta especie en particular. Los programas de manejo para el aprovechamiento del mezquite son recientes, y no existen estudios que establezcan un método silvícola específico que contemple las capacidades productivas de estos bosques y su capacidad de regeneración natural (SRNyMA, 2006). En ese sentido, se han realizado esfuerzos por desarrollar lineamientos técnicos para el aprovechamiento del género *Prosopis*, como los presentados por Valenzuela et al. (2011), quienes proponen un método para la elaboración de programas de manejo y aprovechamiento de especies de mezquite en Durango, Coahuila y Zacatecas. El contenido de dichos programas de manejo se apega en gran medida a los requerimientos normativos para tal fin; sin embargo, el apartado referente al estudio dasométrico carece de la determinación de la calidad de estación (potencial productivo) de las áreas que se manejan actualmente, además de que todavía se carece de información cuantitativa acerca de su crecimiento y desarrollo, esencial para su manejo (Valenzuela, Rivera, Trucíos, & Ríos, 2012).

La clasificación de las áreas forestales con base en su potencial productivo es una herramienta básica en el manejo de los recursos forestales. La calidad de estación se refiere a la capacidad de un lugar (un sitio forestal) determinado para sustentar el crecimiento de los árboles o de cualquier otra vegetación y, en el caso de bosques se denomina productividad forestal (Van Laar & Akca, 2007). La productividad forestal se

ha determinado durante años por métodos directos e indirectos. Los indirectos utilizan variables que afectan el crecimiento de las especies como clima, suelo, fisiografía o vegetación del sotobosque; mientras que los métodos directos están basados en algunas variables del rodal, como volumen total de la masa a lo largo del turno, volumen de la masa a partir de la edad o la altura dominante (Gadow, Sánchez, & Álvarez, 2007). Estos últimos y, en particular el uso de la altura dominante, han demostrado ser los más adecuados para la determinación del potencial productivo, debido a la nula influencia que ejercen la densidad y los tratamientos silvícolas (Álvarez, Barrio, Diéguez, & Rojo, 2004). La productividad es un concepto biológico que puede expresarse matemáticamente a través de índices, que para el caso de la productividad forestal se usa el denominado índice de sitio (Torres, 2001), el cual consiste en determinar la altura máxima (crecimiento) que alcanzan los árboles dominantes o codominantes de un rodal a una edad predefinida denominada edad base (Payandeh & Wang, 1994). Para calcular el índice de sitio se requiere la adopción de un modelo que represente la relación altura dominante-edad y la creación de una familia de curvas de crecimiento en altura dominante generadas con el mismo modelo (Torres, 2001).

Bailey y Clutter (1974) presentaron una técnica para derivar ecuaciones dinámicas de crecimiento conocida como método de diferencias algebraicas (*Algebraic Difference Approach*, ADA). La principal limitante del método es que la mayoría de los modelos derivados son anamórficos o tienen una asíntota común, por lo que Cieszewski y Bailey (2000) propusieron una generalización del método ADA, denominada método de diferencias algebraicas generalizado (*Generalized Algebraic Difference Approach*, GADA). El GADA se fundamenta en que dos o más parámetros de la ecuación base se asumen como dependientes del sitio, generando con ello familias de curvas de crecimiento polimórficas con múltiples asíntotas, dependiendo del parámetro que se aísla de la ecuación. Progresos notables en el campo de la evaluación del índice de sitio existen y, a pesar de una serie de investigaciones encaminadas a generar técnicas nuevas para lograr un manejo óptimo de los recursos forestales, como los modelos de crecimiento en altura dominante, muchos esfuerzos se han enfocado en especies de coníferas de clima templado. Sin embargo, este tema ha sido poco explorado en especies de zonas áridas y semiáridas, las cuales lógicamente poseen tasas de crecimiento diferentes y, las condiciones ecológicas donde se desarrolla también son distintas. Por lo tanto, el presente estudio representa el primer intento científico de aplicar un método desarrollado para especies de ecosistemas distintos a los bosques de coníferas, mediante el análisis de la flexibilidad de algunos modelos ampliamente utilizados en

modelación forestal y generar la una ecuación de crecimiento (altura) dominante para *Prosopis laevigata* del semidesierto de Durango.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El presente estudio se realizó en los municipios de Indé, Rodeo, Nazas y Cuencamé en una superficie de aproximadamente 37,876 ha dentro de la región denominada semidesierto de Durango (Figura 1). Dicha región se ubica en el noreste del estado de Durango, ocupando una superficie de 2'486,288.00 ha. El clima en la región corresponde al Grupo B, al que pertenecen los climas secos, con los subgrupos S (semiárido) y W (árido), con temperaturas de  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; la precipitación promedio anual varía de 350 a 400 mm (SRNyMA, 2006).

### Obtención de la base de datos

El método empleado para la colecta de los datos fue el propuesto por Ríos, Valles, Sosa, Sígala, y Albarrán (2011), quienes desarrollaron ecuaciones para estimar volumen, biomasa y carbono para mezquite en la región centro-norte de México. En ese sentido, 40 árboles dominantes que reflejaran la conformación morfológica natural y que cubrieran todas las condiciones de crecimiento donde se desarrolla *P. laevigata* fueron muestreados. Los árboles considerados fueron aquellos en los que fue posible identificar un fuste principal, o en su defecto, aquel árbol que presentara una bifurcación a una altura menor a 10 cm sobre la superficie del suelo, considerando en este caso el tallo más grueso para el análisis. Los árboles fueron derribados para obtener rodajas a la altura del tocón (0.10 m desde la superficie del suelo), diámetro normal (1.30 m desde la superficie del suelo) y, cuando

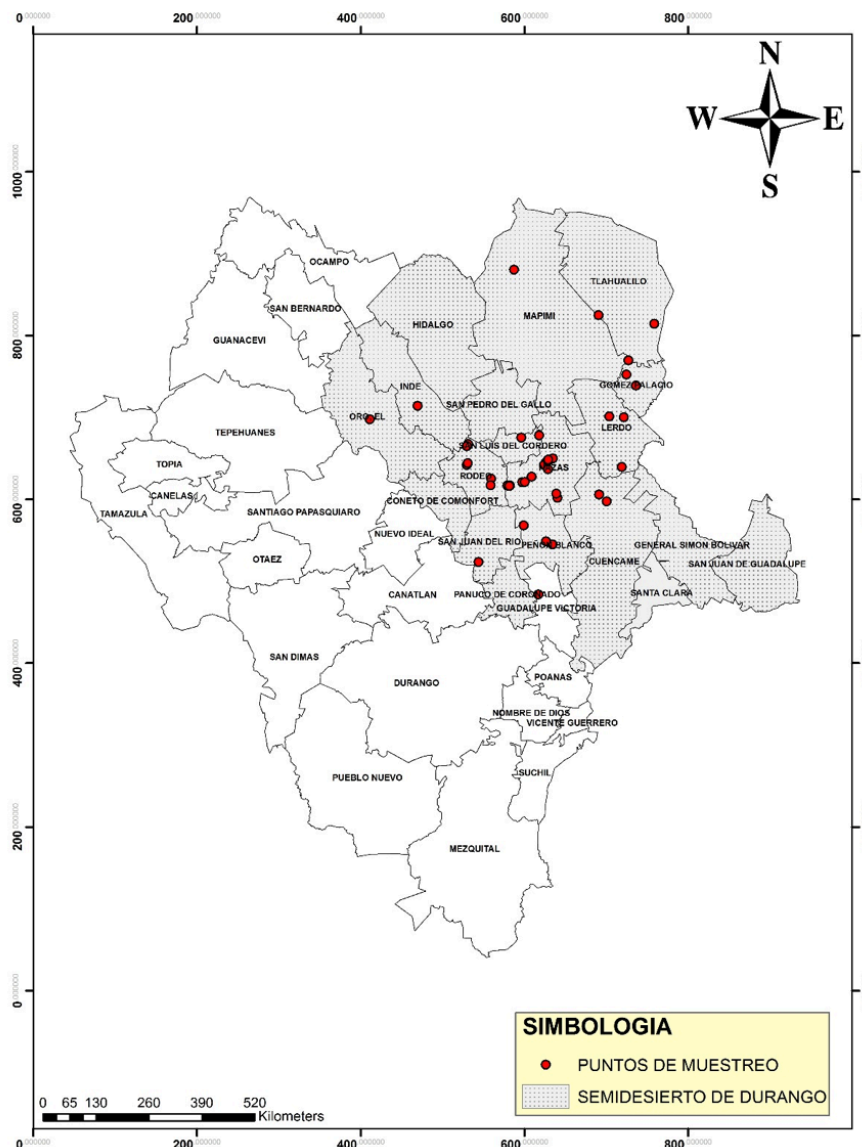


Figura 1. Área de estudio

fue posible, a cada metro a partir del diámetro normal. Las rodajas fueron llevadas al laboratorio para la determinación de la edad mediante la técnica de análisis troncal. A pesar de la dificultad que representa la realización de análisis troncales en especies que ramifican muy cerca de la superficie suelo, el uso de un microscopio electrónico facilitó considerablemente la identificación de los anillos de crecimiento (Figura 2). Las alturas se estimaron con el método de Carmean (1972), modificado por Newberry (1991).

### Modelos analizados

Los modelos de Schumacher y Chapman-Richards se ajustaron mediante ADA y los modelos de Korf, Hossfeld y Chapman-Richards (Rodríguez-Carrillo, Cruz-Cobos,

Vargas-Larreta, & Hernández, 2015; Ríos, Valles, Sosa, Sígala, & Albarrán, 2007; Vargas, Álvarez, Corral, & Aguirre, 2010) se ajustaron a través de GADA para probar su capacidad predictiva del crecimiento (altura) dominante y construir familias de curvas de índice de sitio. La expresión de los modelos base, así como su versión ajustada mediante ADA y GADA se presentan en los Cuadros 1 y 2. El ajuste para la estimación de los parámetros se realizó utilizando el método iterativo (nested iterative procedure) que es invariante con respecto a la edad de referencia (Tait, Cieszewski, & Bella, 1988; Cieszewski & Bailey, 2000; Vargas *et al.*, 2010). Este método estima los efectos específicos del sitio asumiendo que los errores aleatorios en los datos y de medición, que siempre existen, deben ser modelados (Cieszewski, 2003).



Figura 2. Anillos de crecimiento en una rodaja de *Prosopis laevigata*

Cuadro 1. Modelos base y expresión en forma ADA de los modelos ajustados.

| Modelo  | Familia de curvas     | Ecuación  |    |
|---|-----------------------|---|----|
| Schumacher  | Anamórfico $\beta_0$  | $H_2 = H_1 e^{\beta_1 \left( \frac{H_1^2}{E_1} - \frac{H_2^2}{E_2} \right)}$  | M1 |
| $H = B_0 e^{-\beta_1 \left( \frac{1}{E} \right)}$ | Polimórfico $\beta_1$ | $H_1 = \beta_0 \left( \frac{H_1}{\beta_0} \right)^{\left( \frac{E_1}{E_2} \right)}$   | M2 |
|   | Anamórfico $\beta_0$  | $H_2 = H_1 \left( \frac{1 - e^{-\beta_1 E_2}}{1 - e^{-\beta_1 E_1}} \right)^{\beta_2}$  | M3 |
| Chapman Richards                                  | Polimórfico $\beta_1$ | $H_2 = \beta_0 \left( 1 - \left[ 1 - (H_1/\beta_0)^{1/\beta_2} \right]^{E_2/E_1} \right)^{\beta_2}$                             | M4 |
|   | Polimórfico $\beta_2$ | $H_2 = \beta_0 \left( \frac{H_1}{\beta_0} \right)^{\left( \frac{\ln(1 - e^{-\beta_1 E_2})}{\ln(1 - e^{-\beta_1 E_1})} \right)}$ | M5 |

donde:  $H_2$  = altura dominante a la edad 2 (años);  $H_1$  = altura dominante a la edad 1(año);  $E_2$  = edad 2 (años);  $E_1$  = Edad 1 (año);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  =Parámetros de regresión;  $\ln$ = logaritmo natural;  $e$ = exponencial.

**Cuadro 2.** Modelos base y expresión en forma GADA de los modelos ajustados

| Modelo  | Parámetros relacionados al sitio     | Solución para X con valores iniciales ( $t_0, Y_0$ )   | Ecuación dinámica   |
|---|--------------------------------------|--|---|
| Chapman-Richards:<br>$Y = a_1 [1 - e^{-a_2 t}]^{a_3}$ | $a_1 = e^X$<br>$a_3 = b_2 + b_3/X$   | $X_0 = 1/2 [\ln Y_0 - b_2 L_0 + \sqrt{(\ln Y_0 - b_2 L_0)^2 - 4b_3 L_0}]$<br>dónde: $L_0 = \ln [1 - e^{-b_1 t_0}]$ | $Y = Y_0 \left[ \frac{1 - e^{-b_1 t}}{1 - e^{-b_1 t_0}} \right]^{b_2 + b_3 / X_0}$ M6 |
| Hossfeld:<br>$Y = \frac{a_1}{1 + a_2 t^{-a_3}}$       | $a_1 = b_1 + X$<br>$a_2 = b_2 + X$   | $X_0 = 1/2 [Y_0 - b_1 + \sqrt{(Y_0 - b_1)^2 + 4b_2 Y_0 t_0^{-b_3}}]$   | $Y = \frac{b_1 + X_0}{1 + b_2 / X_0 t_0^{-b_3}}$ M7                                   |
| Korf:<br>$Y = a_1 e^{-a_2 t^{a_3}}$                   | $a_1 = e^X$<br>$a_2 = (b_1 + b_2)/X$ | $X_0 = 1/2 t_0^{-b_3} \{ b_1 + t_0^{-b_3} \ln(Y_0) + \sqrt{4b_2 t_0^{-b_3} + [b_1 - t_0^{-b_3} \ln(Y_0)]^2} \}$    | $Y = e^{X_0} e^{\left[ \left( \frac{b_1 - b_2}{X_0} \right) t^{b_3} \right]}$ M8      |

donde: Y= altura dominante (m), ti= edad de referencia o edad base (años), ai=parámetros dentro de las ecuaciones base, mientras que bi=parámetros globales para las formulaciones GADA

### Criterios de selección de los modelos ajustados

Los criterios para juzgar la bondad de ajuste de las ecuaciones de índice de sitio se basaron en los estadísticos coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (REMC), cuyas expresiones son:

$$R^2_{adj} = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] * \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \quad (9)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (10)$$

Donde:  $y_i$ ,  $\hat{y}_i$ ,  $\bar{y}_i$  = valores observados, predicho y medio de la altura, respectivamente; n = número de observaciones y p = número de parámetros del modelo.

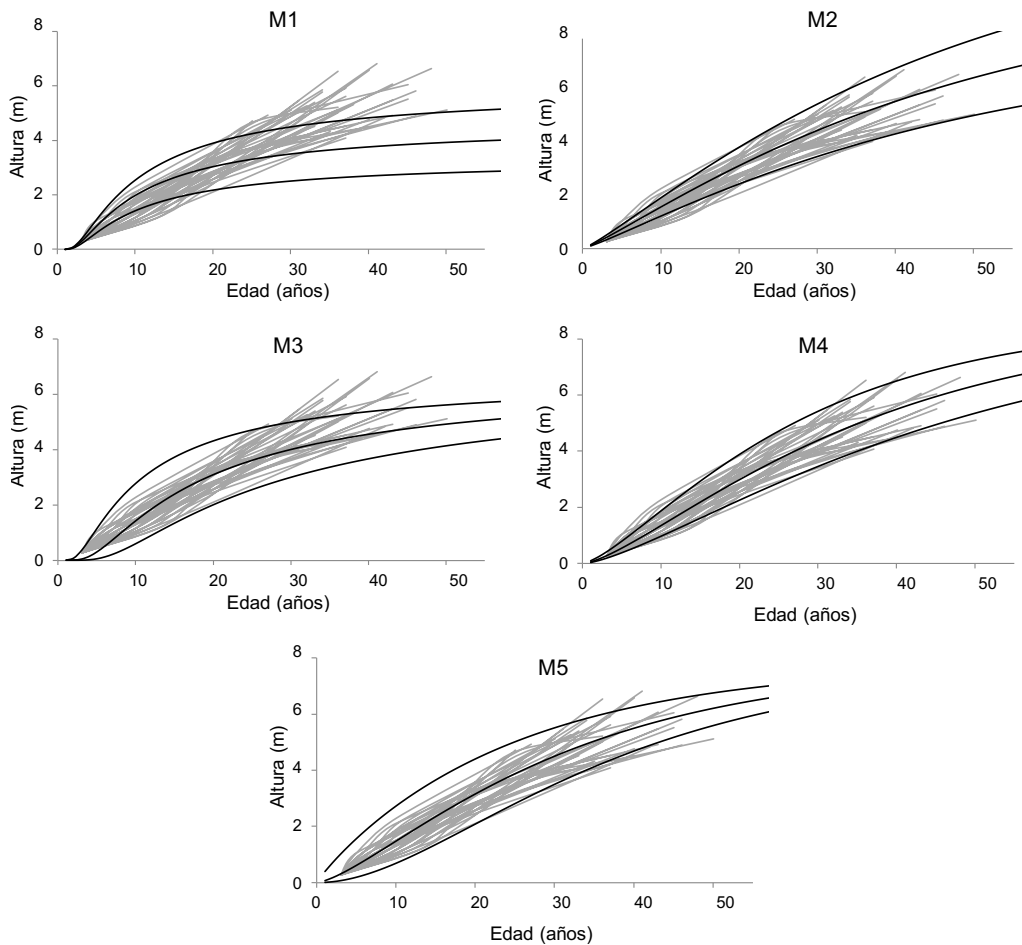
Además, en forma gráfica, se analizó el comportamiento de los modelos al sobreponer las curvas generadas sobre el espectro de los datos observados. De la misma manera se graficaron los residuos y los valores predichos por los modelos y se analizaron las evoluciones del sesgo y del error medio cuadrático por clases de edad. Para corregir la autocorrelación inherente a la dependencia del crecimiento se utilizó un modelo autorregresivo de primer orden (CAR(1), el cual expande el término de error (Gregoire, Schabenberger, & Barrett, 1995; Parresol & Vissage, 1998; Zimmerman & Nuñez, 2001). El ajuste simultáneo de la ecuación de crecimiento de la estructura del error (dada por el modelo autorregresivo) se realizó empleando el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS™ (SAS Institute Inc., 2004), que permite una actualización dinámica de los residuos.

### Resultados y discusión

Al comparar los modelos ajustados con el procedimiento ADA, los modelos M4 y M5 de Chapman-Richards presentaron la mejor bondad ajuste; estos modelos generan curvas polimórficas. Estos resultados son congruentes con los reportados por Tewari y Kishan (2002) y Tewari y Singh (2009), quienes demostraron que el modelo de Chapman-Richards ajustado mediante ADA predice de manera adecuada a los datos altura-edad de *Azadirachta indica* y *Tecommella undulata*, especies similares en estructura morfológica a *P. laevigata* (Valenzuela et al., 2012). Los ajustes obtenidos mediante el procedimiento GADA indican que los modelos M6 y M8 fueron mejores que los ajustados con el procedimiento ADA (Cuadro 3). Los resultados de los ajustes con el procedimiento GADA concuerdan con los reportados por Corral, González, González, y Gadow (2004), Diéguez-Aranda, Burkhart, y Amateis (2006), Vargas (2010), Díaz-Maroto, Fernandez-Parajes, y Vila-Lameiro (2010) y Tamarit-Urias et al. (2014) en especies como *Betula pubescens*, *Pinus cooperi* Blanco, *Quercus pirenaica* y *Tectona grandis*, respectivamente. Los modelos anamórficos M1 y M3 presentan asíntotas tempranas y, a medida que la edad aumenta, se observa una subestimación considerable de la altura dominante. En cambio, las curvas polimórficas describen mejor el comportamiento del crecimiento. Dentro de estas familias de curvas polimórficas, el modelo M2 de Schumacher presentó estimaciones adecuadas de altura dominante, cubriendo completamente el rango de alturas de la muestra (Figura 3). Por otro lado, las estimaciones del modelo M5 de Chapman-Richards sobreestiman las alturas observadas en los sitios de mejor calidad y las subestiman en sitios de calidad baja. Las curvas generadas a través de modelos de Chapman-Richards (M6), Hossfeld (M7) y Korf (M8)

**Cuadro 3. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos evaluados.**

| Forma del modelo | Modelo | Parámetro      | Valor estimado | Error Std. Aprox. | Valor-t | Valor-p aprox. | REMC   | R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> |
|------------------|--------|----------------|----------------|-------------------|---------|----------------|--------|-------------------------------|
| ADA              | M1     | b <sub>1</sub> | -8.5815        | 0.4604            | -18.64  | <.0001         | 1.194  | 0.51                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | -0.0235        | 0.0056            | -4.13   | <.0001         |        |                               |
|                  | M2     | b <sub>1</sub> | 1.1843         | 0.0818            | 14.48   | <.0001         | 0.628  | 0.86                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | 6.6933         | 0.3281            | 20.40   | <.0001         |        |                               |
|                  | M3     | b <sub>0</sub> | 8.6689         | 0.4936            | 15.54   | <.0001         | 0.537  | 0.90                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | 1.4561         | 0.0829            | 17.57   | <.0001         |        |                               |
|                  | M4     | b <sub>0</sub> | 7.7905         | 0.5719            | 13.62   | <.0001         | 0.478  | 0.92                          |
|                  |        | b <sub>1</sub> | 0.0387         | 0.0057            | 6.76    | <.0001         |        |                               |
| GADA             | M6     | b <sub>1</sub> | 0.0281         | 0.0027            | 10.23   | <.0001         | 0.2647 | 0.98                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | 2.0358         | 0.2240            | 9.09    | <.0001         |        |                               |
|                  |        | b <sub>3</sub> | -1.5084        | 0.4746            | -3.18   | <.0001         |        |                               |
|                  | M7     | b <sub>1</sub> | 7.6981         | 11.2656           | 0.68    | 0.4954         | 0.2959 | 0.98                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | 1840.332       | 2944.2            | 0.63    | 0.5328         |        |                               |
|                  |        | b <sub>3</sub> | 1.3779         | 0.0784            | 17.59   | <.0001         |        |                               |
|                  | M8     | b <sub>1</sub> | -45.4641       | 1.9610            | -23.18  | <.0001         | 0.3203 | 0.97                          |
|                  |        | b <sub>2</sub> | 582.3503       | 42.4078           | 13.73   | <.0001         |        |                               |
|                  |        | b <sub>3</sub> | 0.0978         | 0.0014            | 68.91   | <.0001         |        |                               |

**Figura 3. Curvas de calidad generadas con el método ADA a la edad de referencia de 30 años para *Prosopis laevigata*.**

ajustadas mediante GADA indican que, aunque todas las curvas presentan tendencias aceptables, el modelo M6 describe mejor el patrón de crecimiento dominante de *Prosopis laevigata*. Estos modelos generan familias de curvas polimórficas con múltiples asíntotas (Figura 4).

Las familias de curvas de índice de sitio generadas con los procedimientos ADA y GADA (Figuras 3 y 4) permiten clasificar los bosques naturales de *P. laevigata* de acuerdo a su potencial productivo, permitiendo diferenciar, por lo tanto, la productividad maderable de los rodales y planear las actividades silvícolas en la masa forestal (McKenney & Pedlar, 2003), al tomar en cuenta que la calidad de estación depende del tipo de suelo en que se desarrolla la especie (Montero, Ugalde, & Kanninen, 2001), características ambientales, densidad de la masa (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997) o bien las condiciones de manejo del bosque (Delgado et al., 2009).

Los gráficos de residuales y valores predichos muestran que la distribución de los residuos del modelo M6 ajustado con GADA tiene una tendencia más homogénea y con menor rango de dispersión que el modelo M4 estimado con el procedimiento ADA (Figura 5). De igual forma, el análisis de la evolución del sesgo y la raíz del

error medio cuadrático por clases de edad corroboran que los mejores modelos fueron los polimórficos M4 y M6 ajustados con los procedimientos ADA y GADA, respectivamente (Figura 6); sin embargo, los errores obtenidos con el modelo M6 son menores y más homogéneos que los del modelo M4 (Figura 5).

Una vez seleccionado el mejor modelo (M6), el efecto de autocorrelación de los errores se procedió a corregirlo, utilizando un modelo autorregresivo de primer orden (CAR(1)). Al ajustar el modelo que incluye la estructura de los errores, la tendencia de los residuales desaparece. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rodríguez-Carrillo et al. (2015) quienes generaron ecuaciones de índice de sitio para *Juniperus deppeana* en el semidesierto duranguense. Por su parte, Stankova y Diéguez-Aranda (2012) reconocen que los modelos ajustados con el procedimiento GADA presentan mejores valores de los estadísticos de bondad de ajuste; sin embargo, en un estudio realizado con *Pinus silvestris*, los modelos anamórficos ajustados mediante ADA presentaron mejor bondad de ajuste que los ajustados a través de GADA.

Algunos usuarios de las curvas de índice de sitio suponen, erróneamente, que el objetivo de los

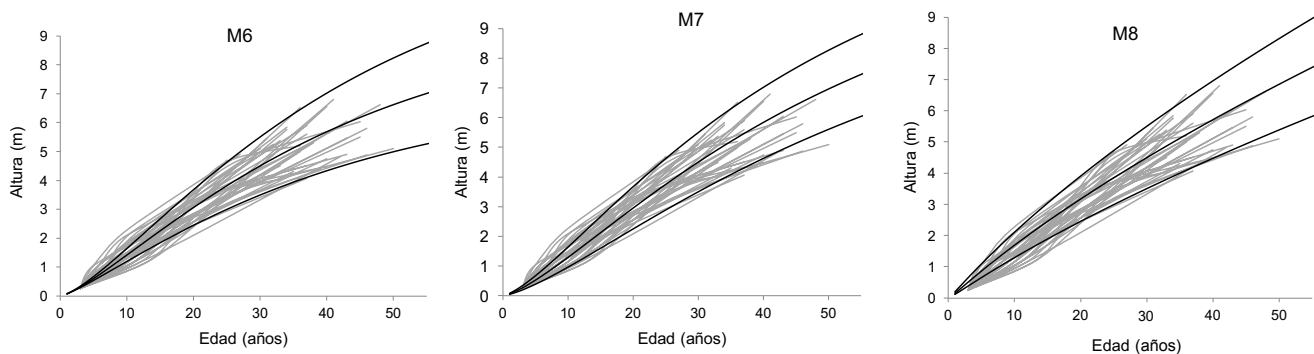


Figura 4. Curvas de calidad generadas con el método GADA a la edad de referencia de 30 años para *Prosopis laevigata*

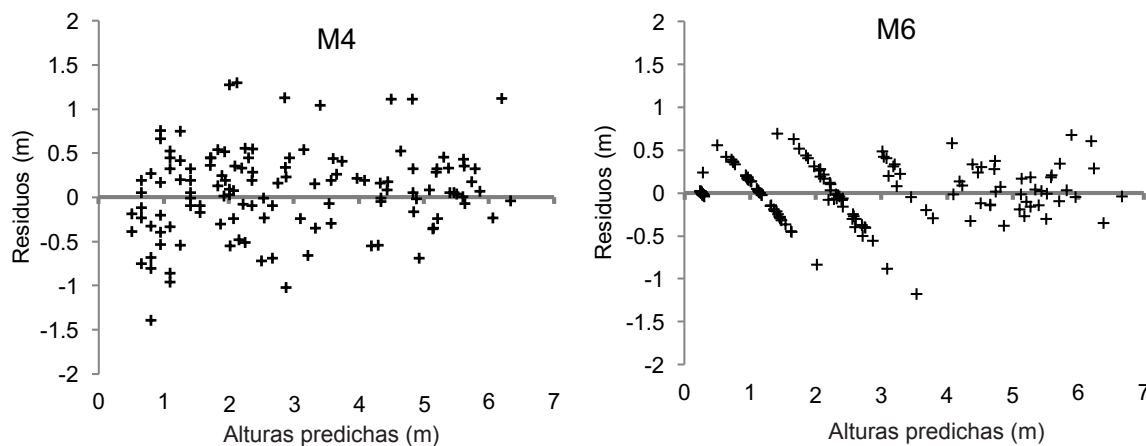
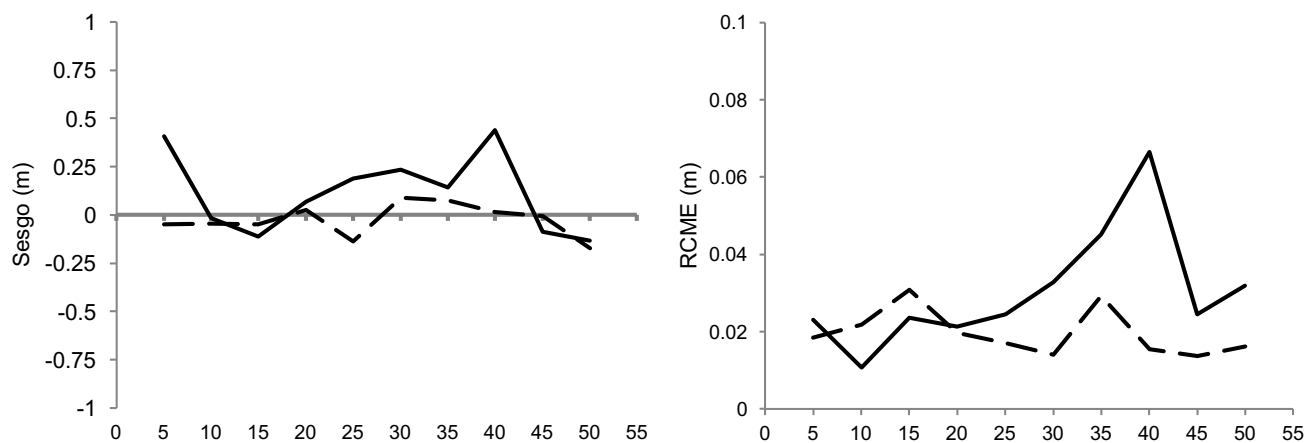


Figura 5. Residuos frente a alturas predichas con el modelo M4 (Chapman-Richards Polimórfico 1 ADA) y el M6 (Bertalanffy-Richards GADA)



**Figura 6. Evolución del sesgo y la raíz del error medio cuadrático (RCME) en las predicciones de altura con la ecuación en forma ADA de Chapman Richards polimórfico I (M4 línea continua) y en forma GADA Chapman-Richards (M6 línea punteada) ajustada a los datos de *P. laevigata*.**

procedimientos de índice de sitio es la predicción de la altura del rodal a una edad indicada. El verdadero propósito es la selección del patrón de crecimiento en términos de altura dominante que el rodal puede seguir durante todo su desarrollo como un medio para calificar la productividad del sitio (Clutter, Fortson, Pienaar, Brister, & Bailey, 1983).

### Conclusiones

Los modelos empleados tradicionalmente para describir el crecimiento (altura) dominante a partir de la edad de pináceas en bosques templados son adecuados, también para describir el patrón de crecimiento dominante de *Prosopis laevigata*. Aunque los estimadores de bondad de ajuste de los modelos ajustados mediante GADA mostraron diferencias no significativas entre modelos, el análisis gráfico permitió concluir que el modelo de Chapman-Richards mostró el comportamiento biológico más razonable al sobreponer las curvas de índice de sitio sobre los datos observados de altura-edad. Las curvas de índice de sitio para *Prosopis laevigata*, son las primeras elaboradas en la región del semidesierto de Durango y se consideran una herramienta básica en la planeación de los aprovechamientos forestales en esta región; además, esta herramienta permitirá justificar técnicamente la aplicación de tratamientos silvícolas.

### Referencias

Álvarez, G. J., Barrio, A. M., Diéguez, A. U., & Rojo, A. A. (2004). Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 18(1), 303-309.

Bailey, R., & Clutter, J. (1974). Base-age invariant polymorphic site curves. Forest Science, 20, 155-159.

Carmean, W. H. (1972). Site index curves for upland oaks in the Central States. Forest Science, 18, 109-120.

Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., & Álvarez-González, J. G. (2007). Modeling stand basal area growth for radiata pine plantations in northwestern Spain using the GADA. Ann. For. Sci. 64, 609-619.

Cieszewski, C. J., & Bailey, R. L. (2000). Generalized Algebraic difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. For. Sci. 46, 116-126.

Cieszewski, C. J. (2003). Developing a well-behaved dynamic site equations using a modified Hossfeld IV function  $Y_3=(axm)/(c+xm-1)$ , a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. For. Sci., 49, 539-554.

Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, G., Brister, G., & Bailey, R. (1983). Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley and Sons. New York, USA. 333 p.

Corral, R. J. J., González, J. G. A., González, A. D. R., & Gadow, K. V. (2004). Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango, México. For. Ecol. Manage., 201, 145-160.

Delgado-Caballero, C. E., Gómez-Guerrero, A. J., García-Salazar, A., Valdez-Lazalde, J. R., de los Santos P. H. M., Fierros-González, A. M., & Horwath, W. R. (2009). Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* en el sureste de México. Agrociencia, 43(1): 61-72.

Díaz-Maroto, I. J., Fernández-Parajes, J., & Vila-Lameiro, P. (2010). Site index model for natural stands of rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in Galicia, NW Iberian Peninsula. Ciencia Forestal, 20(1), 57-68.

Diéguez-Aranda, U., Burkhart, H. E., & Amateis, R. L. (2006). Dynamic (*Pinus taeda* L.) plantations in the United States. Forest Science, 52, (3), 262-272.

Gadow, K.V., Sánchez Orois, S., & Álvarez González, J. G. (2007). Estructura y Crecimiento del Bosque. Universidad de Santiago de Compostela. 282 p. (ISBN 978-84-690-7535-7).

Gregoire, T. G., Schabenberger, O., & Barrett, J. P. (1995). Linear modeling of irregularly spaced,

- unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements. *Can. J. For. Res.*, 25, 137-156.
- McKenney, D. W., & Pedlar, J. H. (2003). Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology Management*, 175, 497-507.
- Meza, R. & Osuna, E. (2003). Estudio dasométrico del mezquite en la zona de Las Pocitas, Baja California Sur. Folleto Científico No. 3. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Todos Santos. La Paz, Baja California Sur. México. 56 p.
- Montero, M., Ugalde, L., & Kanninen, M. (2001). Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 35, 13-18.
- Newberry, J. D. (1991). A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. *Forest Science*, 37(1), 368-369.
- Parresol, B. R., & Vissage, J. S. (1998). White Pine Site Index for the Southern Forest Survey. USDA For. Serv. South. Res. Stn., Asheville, NC, Res. Paper SRS-10, 10 pp.
- Payandeh, B. & Wang, Y. (1994). Relative accuracy of a new base-age invariant site index model. *Forest Science*, 40(2), 341-348.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre agricultura, recursos naturales y Desarrollo Sostenible.* San José, Costa Rica. 561 p.
- Ríos, J. C., Valles, A. G., Sosa, G., Sígala, J. A., & Albarrán, D. (2011). Metodología para la estimación de biomasa, volumen y carbono para mezquite en la región norte-centro de México. En: Ríos, J.C., Trucíos, R., Valenzuela, L.M., Sosa, G. y Rosales, R. (Eds.) Libro Técnico No. 25. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. INIFAP. Gómez Palacio, México. pp. 108-134.
- Rodríguez-Carrillo, A., Cruz-Cobos, F., Vargas-Larreta, B., & Hernández, F. J. (2015). Compatible dominant height - site index model for juniper (*Juniperus deppeana* Steud.). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(1), 97-108. doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.09.041
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México.* LIMUSA, México. 432 p.
- SAS Institute, Inc. (2004). *SAS/ETS™ 9.1 User's Guide* Cary, NC. SAS Institute Inc. 2170 p.
- SRNyMA. (2006). Programa Estratégico Forestal 2030. Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango. Victoria de Durango, Dgo. 242 p.
- Stankova, T., & Diéguez-Aranda, U. (2012). A tentative dynamic site index model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Bulgaria. *Silva Balcanica*, 13(1), 5-19.
- Tait, D. E., Cieszewski, C. J., & Bella, I. E. (1988). The stand dynamics of lodgepole pine. *Can. J. For. Res.*, 18, 1255-1260.
- Tamarit-Urias, J. C., de los Santos-Posadas, H. M. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H., & de la Cruz, V. G. (2014). Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. *Agrociencia*, 48, 225-238.
- Tewari, V. P., & Singh, B. (2009). Site index model for *Tecomella undulata* (Sm.) Seem. (Bignoniaceae) plantations in a hot arid region of India. *Journal of Arid Environments*, 73, 590-593.
- Tewari, V. P., & Kishan, K. V. S. (2002). Development of top height model and site index curves for *Azadirachta indica* A. Juss. *Forest Ecology and Management*, 165, 67-73.
- Torres, R. J. M. (2001). Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. *Agrociencia*, 35, 87-98.
- Valenzuela, L. M., Rivera, M., Trucíos, R., & Ríos, J. C. (2012). Características ecológicas y dasométricas de dos comunidades con mezquite (*Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnston en el estado de Durango. *Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable*, 3(1), 32-38.
- Valenzuela N., L. M., Trucíos C., R., Ríos, S., J. C., Sosa, P., G., & González, B., J. L. (2011). Caracterización dasométrica y delimitación de rodales de mezquite en el Estado de Coahuila. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17 (3), 87-96
- Van Laar, A., & Akça, A. (2007). *Forest Mensuration. Managing Forest Ecosystems.* Springer. 383 p.
- Vargas, L. B., Álvarez, G. J. G., Corral, R. J. J., & Aguirre, C. O. A. (2010). Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 33 (4): 343-351.
- Zimmerman D. L., & Núñez-Antón V. (2001). Parametric modeling of growth curve data: An overview. *Test*, 10(1), 1-73. DOI: 10.1007/BF02595823